



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO
CENTRO MULTIDISCIPLINAR DE ANGICOS
CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL

VINICIUS DOS SANTOS VALE

**ESTUDO DA SUSCEPTIBILIDADE A EXPANSÃO POR MÉTODOS INDIRETOS
DE UM SOLO DE ANGICOS/RN**

ANGICOS

2023

VINICIUS DOS SANTOS VALE

**ESTUDO DA SUSCEPTIBILIDADE A EXPANSÃO POR MÉTODOS INDIRETOS
DE UM SOLO DE ANGICOS/RN**

Trabalho Final de Graduação apresentado a
Universidade Federal Rural do Semi-Árido
como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Kléber Cavalcanti Cabral, Prof. Dr.

ANGICOS

2023

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

V149e Vale, Vinicius.
Estudo da susceptibilidade a expansão por
métodos indiretos de um solo de Angicos/RN /
Vinicius Vale. - 2023.
43 f. : il.

Orientador: Kléber Cabral.
Coorientador: Arthur Araújo.
Monografia (graduação) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Curso de Engenharia Civil,
2023.

1. Solos expansivos. 2. Argilas expansivas. 3.
Mecanismos de expansão. 4. Grau de expansividade.
I. Cabral, Kléber, orient. II. Araújo, Arthur, co-
orient. III. Título.

Ficha catalográfica elaborada por sistema gerador automático em conformidade
com AACR2 e os dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Biblioteca Campus Angicos
Bibliotecário: Helder Romero Maia Duarte
CRB: 15/673

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

VINÍCIUS DOS SANTOS VALE

**ESTUDO DA SUSCEPTIBILIDADE A EXPANSÃO POR MÉTODOS INDIRETOS
DE UM SOLO DE ANGICOS/RN**

Trabalho Final de Graduação apresentado a
Universidade Federal Rural do Semi-Árido
como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Civil.

Defendida em: 09 / 10 / 2023.

BANCA EXAMINADORA

Kléber Cavalcanti Cabral, Prof. Dr. (UFERSA)
Presidente

Arthur Gomes Dantas de Araújo, Prof. Dr. (UFERSA)
Membro Examinador

Paulo Leite de Souza Junior, Prof. Me. (IFRN)
Membro Examinador

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por ter me dado sabedoria até aqui, nos momentos difíceis em que pensei em desistir ele quem me segurou nesses e em outras dificuldades.

Agradeço aos meus pais, Gilberto Vale do Nascimento e Lúcia Maria dos Santos Vale, por todo apoio e força que me deram durante toda a jornada acadêmica.

Agradeço a minha filha Lívia Medeiros Vale por toda compreensão pela minha ausência em momentos importantes do seu crescimento.

Agradeço ao meu Orientador, Kléber Cavalcanti por todo conhecimento que me foi repassado durante este trabalho.

Agradeço ao meu Coorientador, Arthur Gomes Dantas de Araújo, pela paciência e conhecimentos que me foram passados durante esta jornada.

Agradeço a Banca Examinadora pela disponibilidade de avaliar este trabalho.

Agradeço aos meus grandes amigos e companheiros inseparáveis dessa jornada, Ana Vitória, Adna Melo, Deverson Rafael, Ingrid Tito, Pablo Klinsmann, Pedro Henrique e Vanessa Karen, por todos os momentos bons e ruins que estiveram ao meu lado dando forças.

Agradeço a Yasmin Luana por ter me dado forças, me encorajando nos momentos mais difíceis desta jornada e sempre me mostrando o quão capaz eu sou.

Agradeço aos meus amigos da vizinhança do apartamento vinte Dara Cristina, Eduardo da Silva, Gislayne Pereira, Sayonara Paiva e Vinicius Araújo pelos momentos inesquecíveis em que passamos juntos.

Ontem passado.

Amanhã futuro.

Hoje agora.

Ontem foi.

Amanhã será.

Hoje é.

Ontem experiência

adquirida.

Hoje, porém, é nossa

hora de fazer e de

construir.

Chico Xavier

RESUMO

O presente estudo destaca a importância dos solos expansivos na construção civil, ressaltando sua capacidade de expansão quando em contato com a água, o que pode causar danos significativos nas estruturas. Embora esses estudos sejam recentes no Brasil, sua relevância tem crescido, especialmente no Nordeste. Os danos causados pelos solos expansivos podem resultar em prejuízos financeiros consideráveis, superando, em alguns casos, desastres naturais. É essencial identificar e compreender esses solos antes de iniciar projetos de construção para prever problemas e encontrar soluções eficazes. Desta forma, este trabalho foi realizado com o intuito de identificar o grau de susceptibilidade a expansão do solo ao lado da Biblioteca da UFERSA em Angicos/RN. A suspeita surgiu devido a rachaduras que surgiram no piso das salas de estudo e que se estendem até o exterior da edificação. O objetivo deste estudo é avaliar a susceptibilidade à expansão do solo próximo à edificação, utilizando métodos indiretos que englobam ensaios de laboratório e critérios específicos para a identificação da possível expansão. De modo geral, foi observado através dos métodos indiretos que o solo possui grau de susceptibilidade a expansão médio, além de ser indicado como solo predominantemente granular, possuindo 48% de finos, 31% de partículas argilosas e 17% de silte. Além disso, como os métodos indiretos não são conclusivos, sugere-se que sejam feitos ensaios de acordo com os métodos diretos para obtenção de resultados mais precisos.

Palavras-chave: Solos expansivos, argilas expansivas, mecanismos de expansão, grau de expansividade.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Classificação da expansibilidade de materiais argilosos.....	24
Figura 2: Local da coleta do solo. a) Biblioteca; b) Angicos/RN	25
Figura 3: Patologia no piso	26
Figura 4: Coleta da amostra.....	26
Figura 5: Preparação do ensaio de compactação. a) destorroamento do solo; b) pesagem do solo.	27
Figura 6: Umidade do solo pelo método da estufa	27
Figura 7: Cilindro grande	28
Figura 8: Compactação do solo	29
Figura 9: Ensaio de granulometria conjunta. A) Peneira 2 mm; b) Pesagem do solo.....	29
Figura 10: Amostra em repouso me solução	30
Figura 11: Aparelho dispersor	30
Figura 12: Densímetro em meio dispersor	31
Figura 13: Preparação da amostra	32
Figura 14: Material disposto na concha.....	32
Figura 15: Ranhura aplicada com cinzel	33
Figura 16: Homogeneização da amostra	33
Figura 17: Amostra na placa de vidro	34
Figura 18: Resultados ensaio de compactação	35
Figura 19: Resultado granulometria	35
Figura 20: Resultado limite de liquidez.....	36
Figura 21: Limite de plasticidade	37
Figura 22: Carta de plasticidade	37
Figura 24: Grau de expansibilidade.....	39
Figura 25: Grau de expansividade pelos métodos indiretos	40

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Métodos de identificação de solos expansivos	20
Tabela 2: Métodos de identificação de solos expansivos de Chen (1975)	22
Tabela 3: Métodos de identificação de solos expansivos de Holtz e Gibbs (1956)	22
Tabela 4: Critérios de Cuéllar (1978)	23
Tabela 5: Critérios de USBR – HOLTZ (1953)	23
Tabela 6: Métodos de identificação de solos expansivos por Dakshanamurthy e Raman (1973)	24
Tabela 7: Sistema de classificação rodoviária	38

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	11
1.1. Objetivos.....	12
1.1.1. Objetivo geral.....	12
1.1.2. Objetivos específicos	12
2. REFERENCIAL TEÓRICO	12
2.1. Definição de solos expansivos.....	13
2.1.1. Expansão	13
2.1.2. Mecanismo de expansão	14
2.2. Métodos de identificação dos solos expansivos	20
2.2.1. Métodos indiretos	20
2.2.2. Métodos indiretos – Identificativos	21
2.2.3. Métodos indiretos – Qualitativos	21
3. MATERIAIS E MÉTODOS	25
3.1. Local do estudo e coleta do solo.....	25
3.2. Ensaio de laboratório	27
4. RESULTADOS.....	34
4.1. Ensaio de compactação.....	34
4.2. Ensaio de granulometria conjunta	35
4.4.1. Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS).....	37
4.5.1. Critério de Prikonski (1952)	38
4.5.2. Critério de Chen (1975)	38
4.5.3. Critério de Holtz e Gibbs (1956)	38
4.5.4. Critérios de Cuéllar (1978)	38
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	41
REFERÊNCIAS	42

1. INTRODUÇÃO

O solo serve de base para todas as obras da engenharia, bem como pode ser utilizado em matérias prima para técnicas construtiva. A ocorrência de solos expansivos podem trazer diversos prejuízos as edificações e problemas de segurança nas estruturas, isso se dá pela variação do volume quando este entra em contato com a água, causando a instabilidade do material, causando patologias em construções, danos em estradas e canais de irrigação (PAIVA, 2016).

No Brasil, os estudos dos solos expansivos ainda são recentes em relação a outros países, em que o tema já é de grande entendimento. Entretanto, com o passar dos anos, o tema ganhou força no país, sendo que, segundo Barbosa (2013), já foi possível identificar esse tipo de solo em diversos estados, como, Paraná, Santa Catarina e São Paulo, no nordeste já foi possível identificar nos estados da Bahia, Ceará e Pernambuco.

Os danos causados pelos solos expansivos podem trazer consequências graves para construção civil como um todo. Nos EUA onde o tema é de grande conhecimento, estima-se que esse tipo de solo causem um prejuízo anual de cerca de US\$ 15 milhões de dólares e que em anos atípicos esse tipo de solo causem grandes perdas monetárias maiores que desastres naturais como terremotos, tornados e tsunamis (NELSON; MILLER, 1992).

O entendimento do tipo de solo é muito importante para se realizar uma construção, pois com um estudo prévio bem feito é possível identificar problemas e antever soluções eficazes. Segundo Cavalcante (2006), uma boa maneira de identificação de um possível solo expansivo é através de manifestações patológicas que venham a surgir nas estruturas, como exemplo, o surgimento de fissuras em épocas de estiagem da região, desaprumo de paredes ou levantamento de partes da edificação durante períodos chuvosos.

Com a verificância visual de patologias do tipo levantamento de piso no inteiror das salas de estudos da Biblioteca da Universidade Federal Rural do Semi-Árido – UFERSA Campus Angicos/RN – BCA, levantou-se a suspeita sobre a caracterização e a susceptibilidade a expansão do solo.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo geral

O presente trabalho tem como objetivo principal a indicação de susceptibilidade a expansão de um solo localizado ao lado da Biblioteca – BCA da Universidade Federal Rural do Semi-Árido – UFERSA, que fica localizada no Município de Angicos/RN, através da utilização de métodos indiretos.

1.1.2. Objetivos específicos

- Realizar ensaio de compactação do solo;
- Realizar ensaios de limite de liquidez – LL e plasticidade – LP;
- Realizar ensaios de granulometria conjunta (peneiramento + sedimentação);
- Realizar a classificação do solo pelo método rodoviário e o método unificado de classificação dos solos (SUCS);
- Utilizar métodos indiretos para indicar a susceptibilidade a expansão do solo estudado.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

Levando em consideração a natureza mineralógica que se apresenta nos solos expansivos, fica muito claro que o aumento volumétrico está associado a variações de umidade que se apresentam neles. Segundo Presa (1978), os problemas que decorrem da expansão são próprios de solos não saturados, sendo praticamente nulos o inchamento potencial das argilas sob o nível do lençol freático.

É possível perceber que os solos expansivos são, na sua maioria, argilas que contém um certo teor de minerais de argilas expansivas, que durante sua história geológica, sofreram intensa dessecação através da perda de água, rebaixamento do lençol freático e evaporação, ocasionando a tensão intersticial tornando-a negativa em relação a pressão atmosférica (PRESA, 1978).

2.1.Definição de solos expansivos

O processo de expansão do solo ocorre quando este é inundado, o que acaba provocando uma variação volumétrica nesse solo, ainda segundo Ayala et al. (1986), para o solo ser caracterizado como expansivo ele deverá apresentar duas características, uma intrínseca, que é característica do próprio solo, como por exemplo: sua composição mineralógica, sua estrutura interna e a sua textura. Outra característica importante é a extrínseca, que acaba levando em consideração aspectos onde o solo está inserido, como por exemplo: a climatologia, a ocupação humana e a vegetação.

A união desse conjunto de características provoca a variação volumétrica do solo, tornando-o expansivo. Por estes fatores um solo expansivo é considerado muito instável, podendo trazer graves patologias ou até o colapso das estruturas.

2.1.1. Expansão

O termo expansividade é bastante utilizado para definir as características do solo de ter variações do seu volume com a variação da umidade (AYALA, 1986). Ainda segundo Paiva et al. (2016), as construções onde há presença de solos com instabilidade volumétrica quando inundados, é comum a aparição de diversos problemas graves, onde os mais comuns são fissuras na diagonal embaixo das janelas, acima das portas e até levantamento de pavimentos.

Vilar e Ferreira (2015) discorrem ainda que para que se apresente o potencial expansivo de um solo durante a mudança de umidade são necessárias duas condições: i) as mudanças sazonais; ii) modificações da umidade natural do terreno em decorrência direta da ação do homem. Em relação as mudanças sazonais, ela se dá em decorrência das variações do clima durante todo o ano, essas oscilações da umidade na superfície do terreno dependem da relação precipitação/evaporação.

A expansividade apresenta-se através da relação pressão de expansão e a variação volumétrica. A partir disso, é importante ressaltar que obras que estão inseridas nesse contexto, podem estar sujeitas a um conjunto de comportamentos indesejáveis, que são o resultado das pressões de expansão que ocorrem durante o umedecimento, bem como das variações de volumes de solo. Da mesma forma que o solo se expande quando entra em contato com a umidade, eles se contraem quando estão ressecados e devido a esse processo de expansão/contração, o solo tende a sofrer com fadiga, o que acaba tornando este solo passível de erosão (OLIVEIRA; JESUS; MIRANDA, 2006).

2.1.2. Mecanismo de expansão

Os mecanismos de expansão dos solos podem ser de forma mecânica ou físico-químico, sendo que, a combinação destes dois mecanismos pode interferir de forma direta na mudança do volume de solos que sejam potencialmente expansivos (VARELA, et al. 2021). É importante perceber que toda a capacidade de expansão de um solo depende de vários fatores, que incluem as condições ambientais em que se encontram, o clima da região, cargas externas que sejam aplicadas no local, condições de tensões locais, sua formação estrutural, a identificação de lençol freático, natureza mineralógica, permeabilidade, tamanho dos grãos e a vegetação ao qual está inserido (ATAIDE, 2017).

De acordo com Paiva (2016), a expansão mecânica do solo ocorre em exposição direta as forças de descompressão elástica que estão relacionadas forma prática com o fator tempo, que na prática podem estar interligadas as escavações que são praticadas pelo homem, a ação da movimentação das placas tectônicas e a erosão destes solos. Em relação aos mecanismos de expansibilidade físico-químicos, eles podem ser intercristalinos, intracristalinos e osmóticos (MORAIS, 2017).

A expansibilidade intercristalina se dá através da absorção de água que ocorre entre as partes externas dos cristais encontrados nos minerais argilosos e através dos vazios destes cristais, ou seja, só é possível a absorção de água no interior dos cristais ou entre as camadas estruturais destes (VARELA, et al. 2021). A água que é absorvida por estes cristais acaba formando sucessivas camadas mononucleares sobre as mais diversas partículas dos minerais argilosos, isso faz com que haja um afastamento das unidades estruturais e suas próprias partículas (MORAIS, 2017).

Na expansibilidade intracristalina ocorre um desequilíbrio entre as forças atrativas que fazem ligação das camadas estruturais inferiores e as forças atrativas que ficam responsáveis por absorver a água e que dependem da natureza cristalográfica dos argilominerais (MORAIS, 2017). É importante destacar que existe uma predominância de cargas eletronegativas nas argilas, e quando entram em contato com a água, ocorre a atração dos íons H^+ pelas partículas das argilas e acabam ocupando várias posições entre as camadas cristalográficas havendo a separação para depois atraí-las, tendo como resultado uma dupla camada, onde várias capas de moléculas são fortemente atraídas pela água (VARELA et al. 2021).

Já no caso da expansibilidade osmótica, o processo se difere das demais e sempre ocorre em duas fases. Na primeira, em decorrência da diferença iônica irá ocorrer a entrada das moléculas de água entre as camadas dos argilo minerais forçando-as a se separarem, isso ocorre devido a interação eletrostática entre as diversas superfícies e os cátions que são dispersos no processo, além da energia de absorção das moléculas de água (MORAIS, 2017).

Na segunda fase, ocorre que as superfícies já estão em separação superiores a quatro camadas monomoleculares de água, ou seja, a energia de absorção ali presente já está relativamente reduzida, o que acaba permitindo que a energia de repulsão da dupla camada elétrica venha a se sobrepor. Com todo esse processo em andamento, a absorção contínua de moléculas de água na distância observada tende a aumentar e assim também as forças de repulsão (MORAIS, 2017).

Morais (2017) ainda discorre sobre este conceito afirmando que nos casos das argilas em que o cátion trocável e o sódio tendem a exibir um grau de expansibilidade bem maior que aqueles em que o papel venha a ser assumido pelo cálcio, isso ocorre porque os cátions monovalentes (em fracas concentrações), assumem pressões de expansão superior em decorrência da formação das duplas camadas elétricas em maior extensão.

2.1.3. Fatores que influenciam na expansão

Segundo Ataíde (2017), a capacidade de expansão do solo resulta de diversos fatores e uma série de combinações de eventos. Estes fatores que possibilitam o desencadeamento dos processos de expansão podem ser divididos em:

- Densidade seca – onde existe uma elevada densidade usual em que há indícios de espaçamento menores entre as partículas, onde se apresentarão grandes forças de repulsa entre elas e elevado potencial de expansibilidade do solo (MORAIS, 2017);
- Estrutura do solo – no caso das argilas floculadas podem apresentar maior poder de expansão em comparação com as argilas dispersas, além disso, a sua estrutura e textura são alteradas com a compactação e apresentam maior teor de umidade ou remoldagem;
- Mineralogia das argilas – de acordo com Paiva (2016), os argilominerais que venham a causar variações no seu volume no solo são as montmorilonitas, vermiculitas e algumas camadas mistas de minerais. As caulinitas e ilitas em sua grande maioria não são expansivas, mas é possível observar em alguns casos a variação do seu volume quando estas partículas são extremamente pequenas;

- Plasticidade – de acordo com Ataíde (2017), é possível perceber que os solos exibem comportamentos plásticos sobre grandes variações de umidade, apresentam alto limite de liquidez e possuem um maior potencial do processo de expansão e contração, sendo a plasticidade um bom indicador do potencial de expansibilidade do solo;
- Química da água presente no solo – segundo Ataíde (2017) o processo de expansão nesse processo é bem reduzido devido ao aumento da concentração e valência do cátion. Os cátions de Mg^{2+} na presença da água no solo tem como resultado uma menor expansão de cátions de Na^{+} ;
- Sucção – de acordo com Barbosa (2019), o termo sucção está ligado a capacidade do solo de absorver ou reter água, além disso, está associado a expansibilidade do solo. Este parâmetro é bastante importante pois através dele é possível a previsão das propriedades e características do fluxo de água, além da relação resistência/deformação do solo. A sucção do solo tem relação direta com o grau de saturação, tamanho e forma dos poros, características químicas e elétricas das partículas do solo e água, gravidade e a tensão superficial.

Dentre esses fatores apresentados que influenciam diretamente na capacidade de expansibilidade dos solos, Paiva (2016) ainda destaca algumas situações que também contribuem para estes processos ocorrerem, são eles:

- Água do subsolo – lençóis rasos de água são uma grande fonte de umidade para o solo e lençóis de água superficiais ajudam na elevação do nível de umidade, contribuindo diretamente para a expansão do solo;
- Carregamento – uma grandeza de sobrecarga que quando aplicada, influi quantitativamente na mudança de volume que venha a ocorrer em relação ao teor de umidade e densidade. Uma carga aplicada externamente busca atuar de forma a balancear as forças repulsivas entre as partículas, resultando na redução da capacidade de expansão do solo;
- Clima – a quantidade de precipitações, suas variações e a evapotranspiração que ocorrem durante todo ano, tem fortes influências na umidade e perfil do solo da região. Como exemplo, no clima semiárido, ocorrem levantamentos periódicos de amostras para análise devido ao curto intervalo de tempo das chuvas;

- Condições de umidade inicial – é possível observar que de acordo com a menor umidade encontrada no solo, maior será a sua capacidade de absorver água e de se expandir. Quando um solo expansivo apresenta mais ressecado, ele terá uma maior afinidade por água e sucção elevada, mas quando este mesmo solo apresenta grande teor de umidade, sua capacidade de absorção de água será comprometida, o que afetará de forma direta na sua expansão;
- Drenagem e fontes de águas superficiais – as estruturas urbanas de drenagem superficiais, como por exemplo, canaletas e sarjetas, podem resultar em vazamentos que transpassarão umidade diretamente para o solo em grandes profundidades e que terão como resultado a expansão do solo;
- Perfil do solo – é importante destacar que de acordo com a espessura e a posição de cada camada que tem potencial expansiva, pode influenciar de forma considerável a movimentação do solo. Os grandes movimentos de porções ocorrem em perfis que possuem argilas expansivas desde a sua superfície até abaixo da zona ativa. Ainda é possível destacar que se este solo for recoberto por material não expansivo ou leito rochoso, ocorrerão movimentações menores;
- Permeabilidade – camadas que possuem elevado índice de permeabilidade em decorrência de fissuras ou rachaduras, permitem que ocorra uma rápida transição de água, o que acarreta em uma rápida velocidade de expansão;
- História de tensões – quando um solo é sobreadensado, ele vem a ser mais expansivo que outro com o mesmo índice de vazios. As pressões de expansão do solo podem aumentar de acordo com o grau de envelhecimento das argilas já compactadas, mas é importante ressaltar, que o valor de expansão mesmo em pequenos carregamentos, não se mostra afetado por esse envelhecimento;
- Variações de umidade – as variações de umidade que ocorrem na parte superior do perfil de solo próximo a zona ativa, definem bem um dos principais fatores de levantamento das estruturas. É possível notar que são nestas camadas onde ocorrem extensas variações da umidade e do volume do solo;
- Vegetação – a vegetação (árvores, arbustos e gramas) que ocorre na região onde se encontram os solos expansivos, podem interferir de forma direta na capacidade expansiva destes solos.

2.1.4. Principais argilominerais e suas estruturas

Os argilominerais são minerais que são bastante comuns em solos e rochas sedimentares. Eles têm como principal composição os silicatos hidratados de alumínio, embora tenham presente na sua estrutura outros tipos de elementos. Os principais argilominerais que se formam no solo são: montmorilonita, caulinita, illita, vermiculita, clorita e mica (VELDE, et al., 1992).

O grupo da montmorilonita possui uma estrutura em camadas, onde cada camada consiste em uma folha de tetraedros de silicato (Si) e octaedros de alumínio (Al) que tem como principal ligação átomos de oxigênio e hidroxilas (OH). As ligações destas camadas ocorrem através das forças de Van der Waals, quando as ligações entre as moléculas apolares mostram uma menor força, o que corrobora com a penetração de água e distância entre as camadas (OLIVEIRA, 2011; HOUSECROFT e SHARPE, 2013).

As montmorilonitas são pequenos cristais que possuem grande capacidade de reter íons e podem ser encontradas em regiões de clima temperado e árido. É importante ressaltar, que quando o solo é pouco intemperizado, logo apresenta grande poder de contração e expansão, mas quando o solo está seco, é possível observar uma consistência mais dura e fendilhada, além disso, quando é umedecido, apresenta alta pegajosidade e plasticidade (ARAÚJO, et al., 2020).

O grupo das caulinitas possuem uma estrutura de camadas semelhante à montmorilonitas, sendo que possuem apenas uma camada de tetraedros de silicato e uma camada de octaedros de alumínio, o que os torna menos expansível e menos plástica que a montmorilonita. A illita também possui a mesma semelhança de camadas da montmorilonitas, mas ocorre uma substituição de íons de potássio (K) entre os espaços das intercamadas, o que acaba resultando em uma expansão mais limitada em comparação às montmorilonitas.

Além disso, a illita possui um filamento octaedro de gipsita entre os dois tetraédricos de sílica, o que apresenta uma maior rigidez nas ligações entre camadas e também a dificuldade da penetração de água e íons. Também é possível observar a presença de potássio na sua estrutura, o que acaba ocasionando baixa expansão do solo, absorção de água e plasticidade (OLIVEIRA, 2011; HOUSECROFT e SHARPE, 2013).

As vermiculitas são argilominerais que possuem semelhanças com a montmorilonitas nas suas camadas, mas apresentam maior expansibilidade devido à grande substituição de íons de magnésio (Mg) em suas camadas, isso permite que estas camadas se separem quando a água é absorvida. Quando entra em contato com a água, a vermiculita apresenta alta pegajosidade e

plasticidade, e quando esta é seca, apresenta fendas e alta dureza na sua estrutura, se dando através da alteração da mica (GRIM, 1953).

O grupo das cloritas apresentam camadas mais espessas em relação as montmorilonitas e uma substituição mais complexa de íons, incluindo magnésio (Mg) e ferro (Fe). A clorita apresenta menor potencial de expansão em comparação com a montmorilonita e em sua composição podem apresentar formação de cristais hexagonais (GRIM, 1953). As micas, como a biotita e a muscovita, também fazem parte do grupo dos argilominerais, elas possuem estrutura em camadas de tetraedros de silicato e octaedros de alumínio (Al), além de apresentar formas cristalinas semelhantes a montmorilonitas, se diferenciando apenas na sua forma química (OLIVEIRA, 2011; HOUSECROFT e SHARPE, 2013).

2.1.5. Tipos de solos sujeitos ao fenômeno da expansão e locais de sua ocorrência

Em diversos campos da engenharia é muito comum a ocorrência de vários problemas que estão diretamente associados aos solos expansivos. Durante o passar dos anos foram detectados a presença desse tipo de solo em diversos continentes, como, África (Angola e Etiópia), Américas (Canadá e Argentina), Austrália (Ilhas Rainha), Eurásia (China e Espanha) e no Oriente Médio (Israel e Jordânia) (SCHREINER, 1987).

Existem diversos tipos de solos que estão sujeitos ao fenômeno de expansibilidade. É possível destacar alguns deles: os solos que tem origem das rochas ígneas (basalto), os feldspatos e piroxênios, que entram em processo de decomposição para formar a montmorilonita e os minerais secundários; os solos que são provenientes das rochas sedimentares que possuem em sua composição montmorilonita como as margas e calcários que se fragmentam facilmente (FERREIRA, 1995).

Com os avanços dos estudos relacionado aos solos expansivos foi possível observar diversos locais no Brasil que possuem esse tipo de material. Na região nordeste, diversas pesquisas possibilitaram encontrar algumas amostras de vertissolos, que se mostram em camadas com formação cretácea, que se localiza ao longo da Bahia e se estende do Pernambuco até o Ceará (VARGAS, 1985). Nas regiões Centro-Sul e Sul do país, foi possível identificar solos expansivos nos estados de São Paulo, Paraná e Santa Catarina e no Rio Grande do Sul (FERREIRA, 1995).

2.2.Métodos de identificação dos solos expansivos

Os solos expansivos podem ser identificados de diversas formas, sendo possível destacar as pesquisas desenvolvidas nos locais, verificando inúmeros fatores como fissuras nas edificações, sinais de contração que estejam visíveis no solo, a topografia e a vegetação, além disso, esses tipos de solos podem facilmente serem identificados através de ensaios laboratoriais e se utilizando de métodos de identificação (PAIVA, 2016).

Ataíde (2017) discorre sobre os vários métodos que são utilizados para identificar os solos expansivos, variam entre simples e mais complexos, métodos esses, que podem ser como métodos diretos e indiretos. Na Tabela 1 é demonstrado estes dois métodos e suas devidas especificações.

Tabela 1: Métodos de identificação de solos expansivos

Métodos	Subdivisões	Critério	Referência
INDIRETOS	Identificativos	Difração e raio-X, Microscopia eletrônica de varredura, Análise termo-diferencial e Adsorção de etilenoglicol e glicerina	Ayala <i>et al.</i> (1986)
		Físico-químico	Fink <i>et al.</i> (1971)
	Orientativos	Granulometria, Consistência e Índices físicos e Classificação Geotécnica	Prikonskij (1952), Skempom (1953), Seed <i>et al.</i> (1962), Van Der Merwe (1964), Chen (1965), Vijayverviya e Ghazzaly (1973), Rodriguez Ortiz (1975), Cuellar (1978). Daksanamurthy e Raman (1973).
	Qualitativos	Geologia, Geomorfologia, Pedologia e Identificação visual.	Patrick e Snethen (1976), Ayala <i>et al.</i> (1986), Ferreira (1990c e 1993a).
DIRETOS	Avaliativos	Ensaio de Expansão de Lambe	Lambe (1960).
	Quantitativos	Expansão Livre e Tensão de Expansão, Ensaios Edométricos Duplos e Simples, placa, Expansocolapsômetro	Seed <i>et al.</i> (1962), Chen (1965), Vijayverviya e Ghazzaly (1973), Rodriguez Ortiz (1975), Cuellar (1978), Jimenez Salas (1980).
		Ensaios Edométricos de Sucção controlada	Escario (1967 e 1969), Aitchison <i>et al.</i> (1973), Johnson (1978), McKeen (1980).

Fonte: Schreiner, 1987; Ferreira, 1993.

2.2.1. Métodos indiretos

Os métodos indiretos são aqueles que se utilizam de índices físicos e o limite de consistência ou até mesmo parâmetros que estão ligados a textura de simples obtenção nos ensaios laboratoriais e campo para indicar ou não o pontencial de expansibilidade do solo (VILA, et. al. 2015). Paiva (2016) ainda disserta que os métodos indiretos tem por objetivo a identificação mineralógica dos elementos que estão presentes no solo ou a correlação entre os índices físicos, a sua composição e o comportamento do solo.

2.2.2. Métodos indiretos – Identificativos

Barbosa (2013) explana que estes métodos se baseiam na identificação das estruturas dos argilominerais que estão presentes no solo. De acordo com Paiva (2016) os métodos indiretos de identificação são:

- a) Adsorção de etileno glicol – este método permite a identificação do tipo de material argiloso do solo. Ele é feito através da quantidade de adsorção de absorção do etileno glicol e também da glicerina em quantidades diferentes para cada tipo de mineral;
- b) Análise térmico diferencial – Paiva (2016) discorre que cada espécie mineralógica em determinada temperatura se diferenciam entre elas, identificando assim, cada tipo de espécie mineralógica;
- c) Capacidade de troca de cátions – este método apresenta as propriedades físico-químicas das argilas, onde estas modificam suas propriedades plásticas em decorrência da facilidade em absorverem cátions através de suas redes cristalinas. É importante destacar que a capacidade de expansão do solo é maior nos cátions do grupo dos alcalinos, ou seja, aqueles que são monovalentes positivos;
- d) Composição da fração argilosa e sua textura – Paiva (2016) explana que este método tem como objetivo determinar a percentagem de minerais na rede cristalina expansiva (vermiculita e a montmorilonita), que possuem relação direta com sua quantidade e a intensidade da capacidade de expansão;
- e) Difração de raio-x – tem como característica principal a identificação dos minerais argilosos se baseando pelo espectro característico da sua difração que se apresentam através do raio-x;
- f) Microscopia eletrônica – é utilizado na identificação dos minerais argilosos que se baseia na dispersão de um feixe de elétrons é forçado a atravessar no solo.

2.2.3. Métodos indiretos – Qualitativos

Barbosa (2013) é claro sobre este método, ele tem como base o percentual de argila, de silte, o limite de liquidez e de plasticidade. É importante destacar que este método não é um critério de identificação preciso para tipos de solos especiais, pois com o resultado do ensaio, é possível que argila apresente potencial expansivo e no fim não seja expansiva. Partindo deste pressuposto, este método apresenta os seguintes critérios de identificação:

a) Critério de Prikhlonski (1952) – a definição deste critério é que a classificação do solo é feita por meio do Índice de Consistência (IC), tendo o solo como classificação:

- $IC < 0$ – Solo altamente colapsível;
- $IC \leq 0,5$ – Solo não colapsível;
- $IC > 1$ – Solo expansível.

b) Critério de Chen (1975) – nesse critério é caracterizado pelo potencial expansivo que vem a se basear pelo limite de liquidez e o índice de plasticidade do solo. Na tabela 2 é possível identificar o funcionamento do critério.

Tabela 2: Métodos de identificação de solos expansivos de Chen (1975)

Grau de Expansão	Chen (1975)	
	LL (%)	IP (%)
Baixo	< 30	0 – 15
Médio	30 – 40	10 – 35
Alto	40 – 60	20 – 55
Muito Alto	> 60	> 35

Fonte: Paiva (2016).

d) Critério de Holtz e Gibbs (1956) – este critério é semelhante ao de Chen, ele se utiliza apenas do índice de plasticidade para fazer a caracterização do solo em termos de expansividade do material. O funcionamento de este critério é exposto na Tabela 3.

Tabela 3: Métodos de identificação de solos expansivos de Holtz e Gibbs (1956)

Grau de Expansão	Holtz e Gibbs (1956)
	IP (%)
Baixo	0 – 15
Médio	10 – 35
Alto	20 – 55
Muito Alto	> 35

Fonte: Paiva (2016).

e) Critérios de Cuellar (1978) – tomam como base as argilas expansivas que foram encontradas na Espanha, tem como principal relação o Limite de Contração (LC) e o Índice de Plasticidade (IP), com a expansividade do solo. O critério de Cuellar é demonstrado na Tabela 4.

Tabela 4: Critérios de Cuéllar (1978)

Limite de Contração (LC)	Índice de Plasticidade (IP)	Grau de Expansividade
LC < 10	IP > 35	Muito alta
8 < LC < 11	25 < IP < 35	Alta
11 < LC < 15	15 < IP < 25	Média
LC > 15	IP < 15	Baixa

Fonte: Paiva (2016).

f) Critérios de Ranganathan e Satynarayana (1965) – estes critérios tomam como base a relação do grau de expansividade em função do Índice de Consistência (IC), parâmetros que estão descritos abaixo:

- IC > 60 – Grau de expansividade muito alta;
- 30 < IC < 60 – Grau de expansividade alta;
- 20 < IC < 30 – Grau de expansividade média;
- IC < 20 – Grau de expansividade baixa.

g) Critérios de USBR – HOLTZ (1953) – neste critério é possível observar a classificação baseada no Índice de Plasticidade (IP) e no Limite de Contração (LC), além do percentual de coloides menores que 0,001mm, como demonstrado na Tabela 5.

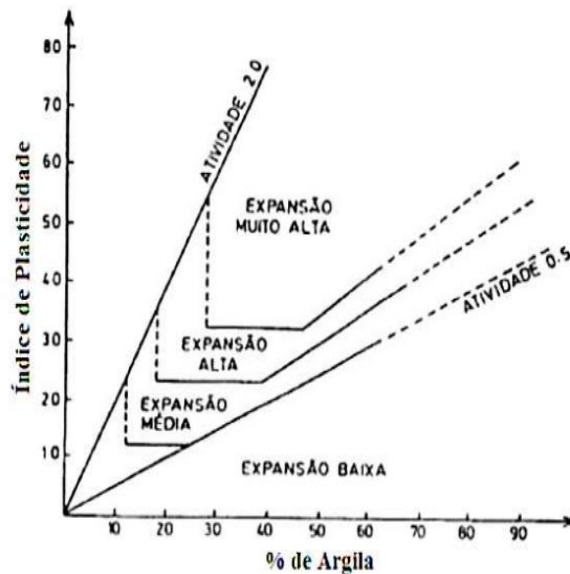
Tabela 5: Critérios de USBR – HOLTZ (1953)

Percentual de Coloides, < 0,001 mm	Índice de Plasticidade (IP)	Limite de Contração (LC)	Grau de Expansividade
> 28	> 35	< 11	Muito alta
20 – 31	25 – 41	7 – 12	Alta
13 – 23	15 – 28	10 – 16	Média
< 15	< 18	> 15	Baixa

Fonte: Paiva (2016).

h) Critérios de Williams e Donaldson (1980) – esse critério faz a utilização de métodos gráficos, onde é relacionado a porcentagem da argila encontrada no solo com o seu índice de plasticidade, resultando na classificação de expansão que pode ser, baixa, média, alta ou muito alta (Figura 1).

Figura 1: Classificação da expansibilidade de materiais argilosos
por Williams & Donaldson (1980)



Fonte: Silva (2018).

- i) Critérios de Daksanamurthy e Raman (1973) – faz a utilização do Limite de Liquidez (LL) no potencial expansivo de um solo. Na Tabela 6 é demonstrado as classificações de acordo com o critério de Daksanamurthy e Raman.

Tabela 6: Métodos de identificação de solos expansivos por Daksanamurthy e Raman (1973)

Grau de Expansão	LL (%)
Baixo	$20 \leq LL \leq 35$
Médio	$35 \leq LL \leq 50$
Alto	$50 \leq LL \leq 70$
Muito Alto	$LL > 70$

Fonte: Adaptado Silva (2018).

2.2.4. Métodos indiretos – orientativos

Com esse método é possível se orientar com base na pedologia, informando aspectos com respeito à porosidade do solo, o ambiente em que o solo foi formado e a sua mineralogia (BARBOSA, 2013). Paiva (2016) discorre sobre o mapa pedológico, ele destaca que através deste mapa é possível identificar o verdadeiro potencial do solo analisado. Este método se utiliza dos seguintes pontos:

- a) Geologia – os solos expansivos que são gerados a partir de rochas ígneas básicas, rochas vulcânicas ou rochas sedimentares argilosas, além da geologia do local ser bem definida os solos expansivos vem sofrendo uma série de estudos, com isso, a aplicação

de mapas geológicos indica de forma precisa as áreas que apresentam grande potencialidade de se encontrar solos expansivos (PAIVA, 2016);

- b) Geomorfologia – Paiva (2016) explana que as condições físicas e químicas onde o intemperismo de uma região ocorre, é um fator decisivo na formação de argilominerais com grande capacidade de expansibilidade como nas rochas de origem;
- c) Identificação visual – tem como fundamentação o reconhecimento em campo, em estradas, em obras e em taludes de materiais com potencial de expansibilidade (BARBOSA, 2013);
- d) Pedologia – Paiva (2016) é categórico em afirmar que este método foi proposto por Ferreira (1990), se baseando nas classes pedológicas e em levantamentos de solos, fazendo a relação das características de solos potencialmente expansivos.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Nesse item serão abordados os materiais que foram utilizados no trabalho, assim como a metodologia aplicada.

3.1. Local do estudo e coleta do solo

Este trabalho é baseado em um estudo de solo, em que foi coletada uma amostra de solo ao lado da Biblioteca da Universidade Federal Rural do Semi-Árido – BCA – UFERSA, que fica localizada na cidade de Angicos/RN (Figura 2).

Figura 2: Local da coleta do solo. a) Biblioteca; b) Angicos/RN



Fonte: Adaptado Google Earth (2023).



Fonte: Autoria própria (2023).

O que motivou o estudo, foram patologias que apresentaram no piso do local, em que se levantou a suspeita da susceptibilidade a expansão do solo (Figura 3).

Figura 3: Patologia no piso



Fonte: Autoria própria (2023).

A coleta da amostra deformada foi realizada ao lado da Biblioteca devido a não autorização da UFERSA para a coleta dentro das salas de estudo e ainda contou com o auxílio de chibanca, carrinho de mão, pás, picareta e sacos de armazenamento (Figura 4). A profundidade do furo mediu cerca de 30 cm.

Figura 4: Coleta da amostra



Fonte: Autoria própria (2023).

3.2. Ensaio de laboratório

Abaixo, serão apresentados os ensaios de laboratório que foram realizados durante o estudo.

3.2.1. Ensaio de compactação

O ensaio foi realizado seguindo as premissas da NBR 1786/2016. Inicialmente, foi separado 8 kg de solo para destorroamento. Em seguida, o material foi passado na peneira 4,8 mm (Figura 5).

Figura 5: Preparação do ensaio de compactação. a) destorroamento do solo; b) pesagem



Fonte: Autoria própria (2023)

Em seguida, foi determinada a umidade do solo pelo método da estufa, o qual foi secado previamente ao ar livre (Figura 6).

Figura 6: Umidade do solo pelo método da estufa



Fonte: Autoria própria (2023).

O próximo passo consiste na montagem do cilindro grande (Figura 7), colocando um disco espaçador na parte superior do cilindro, uma folha de papel filtro de diâmetro igual ao do molde.

Figura 7: Cilindro grande



Fonte: Autoria própria (2023).

Após a montagem do cilindro, o solo foi colocado em uma bandeja para preparação da amostra. Com o auxílio de uma proveta foi adicionado gradativamente cerca de 3% de água, homogeneizando o material continuamente. Então, foi iniciado o processo de compactação do solo em cinco camadas, aplicando 12 golpes em cada camada com o cilindro grande (Figura 8).

Figura 8: Compactação do solo



Fonte: Autoria própria (2023).

Ao compactar a última camada, o cilindro auxiliar foi retirado e com o auxílio de uma régua, foi removido o excesso de material que estava acima do molde. Após essa etapa, o corpo de prova é pesado e retirado com o auxílio de um conjunto hidráulico. Finalmente, foi determinada a umidade do solo através do método da estufa.

3.2.2. Ensaio de granulometria conjunta

O ensaio foi realizado tomando como base os dados contidos na NBR 7181/2016. Foi utilizado 1kg de solo previamente destorroado e foi passado na peneira 2 mm. O material retido foi lavado em água corrente e levado para estufa para ser utilizado no peneiramento grosso (Figura 9).

Figura 9: Ensaio de granulometria conjunta. A) Peneira 2 mm; b) Pesagem do solo.



Fonte: Autoria própria (2023).

3.2.2.1.Sedimentação

Do material que passou na peneira 2 mm, foi separado 100g para iniciar o processo de sedimentação. Para isso, o material foi misturado em uma solução de hexametáfosfato de sódio e colocado em repouso durante o período de 12h (Figura 10).

Figura 10: Amostra em repouso me solução



Fonte: Autoria própria (2023).

Em seguida, o solo foi colocado no copo dispersor por 15 minutos para separação das partículas (Figura 11).

Figura 11: Aparelho dispersor



Fonte: Autoria própria (2023).

A mistura foi transferida para a proveta, limpando todo o material que estava aderido ao copo com água destilada e uma bisnaga de auxílio. Com o ajuda da baqueta de vidro, a

mistura foi mexida de forma contínua líquido dentro da proveta, com a finalidade de manter as partículas em suspensão. Imediatamente após a agitação, foi anotado a hora exata do início da sedimentação, iniciando o mergulho com cuidado do densímetro dentro da dispersão (Figura 12).

Figura 12: Densímetro em meio dispersor



Fonte: Autoria própria (2023).

Foi efetuado as leituras correspondentes aos tempos de (t) de 0,5 min, 1 min e 2 min. Continuar as leituras subsequentes à 4 min, 8 min, 15 min, 30 min, 1 h, 2 h, 4 h, 8 h e 24 h. Após as duas primeiras leituras serem executadas, medir a temperatura da dispersão com resolução de 0,1 °C.

Ao final do processo, foi efetuada a lavagem do material em água corrente e levado para a estufa. Este material foi utilizado no peneiramento.

3.2.2.2.Peneiramento fino

O peneiramento fino foi realizado com a sequência de peneiras 1,2 mm, 0,6 mm, 0,42 mm, 0,25 mm, 0,15 mm e 0,075 mm. E foi anotado a massa de solo retido em cada peneira.

3.2.2.3.Peneiramento grosso

Já o peneiramento grosso foi realizado com a sequência de peneiras 50 mm, 38 mm, 25 mm, 19 mm, 9,5 mm, e 4,8 mm.

3.2.3. Ensaio de limite de liquidez

O ensaio foi realizado em consonância com a NBR 6459/2016. A princípio, foi separado 200 g de material para o processo. Após isso, foi adicionado água a amostra para homogeneização do solo. Com auxílio de uma espátula, a amostra foi homogeneizada de forma contínua por cerca de 5 minutos (Figura 13).

Figura 13: Preparação da amostra



Fonte: Autoria própria (2023).

Logo após a preparação da amostra, parte do material foi transferido para o aparelho de Casagrande, na concha na parte central com espessura de 10 mm (Figura 14).

Figura 14: Material disposto na concha



Fonte: Autoria própria (2023).

Próximo passo consiste na abertura de uma ranhura utilizando o cinzel para iniciar os golpes no aparelho. Girando a manivela do Casagrande, aplica-se golpes na concha até que as bordas da ranhura se unam ao longo de 13 mm de comprimento (Figura 15).

Figura 15: Ranhura aplicada com cinzel



Fonte: Autoria própria (2023).

Após isso, adicionou-se água novamente a amostra para sua completa homogeneização por cerca de 3 minutos, para obtenção dos demais pontos. Foi obtido ao total cinco pontos para geração dos dados deste ensaio, cobrindo o intervalo de 35 à 15 golpes. Por fim, foi determinado a umidade do solo pelo método da estufa.

3.2.4. Ensaio de limite de plasticidade

O ensaio foi realizado seguindo as premissas da NBR – 7180/2016. A princípio, foi separado cerca de 200 g de solo para o ensaio. Após isso, foi adicionado água a amostra para sua homogeneização de forma contínua com o auxílio de uma espátula por cerca de 5 minutos (Figura 16).

Figura 16: Homogeneização da amostra



Fonte: Autoria própria (2023).

O próximo passo foi rolar a amostra na placa de vidro com pressão da mão para que ela se deformasse, formando um cilindro com cerca de 3 mm de diâmetro e 100 mm de comprimento (Figura 17).

Figura 17: Amostra na placa de vidro



Fonte: Autoria própria (2023).

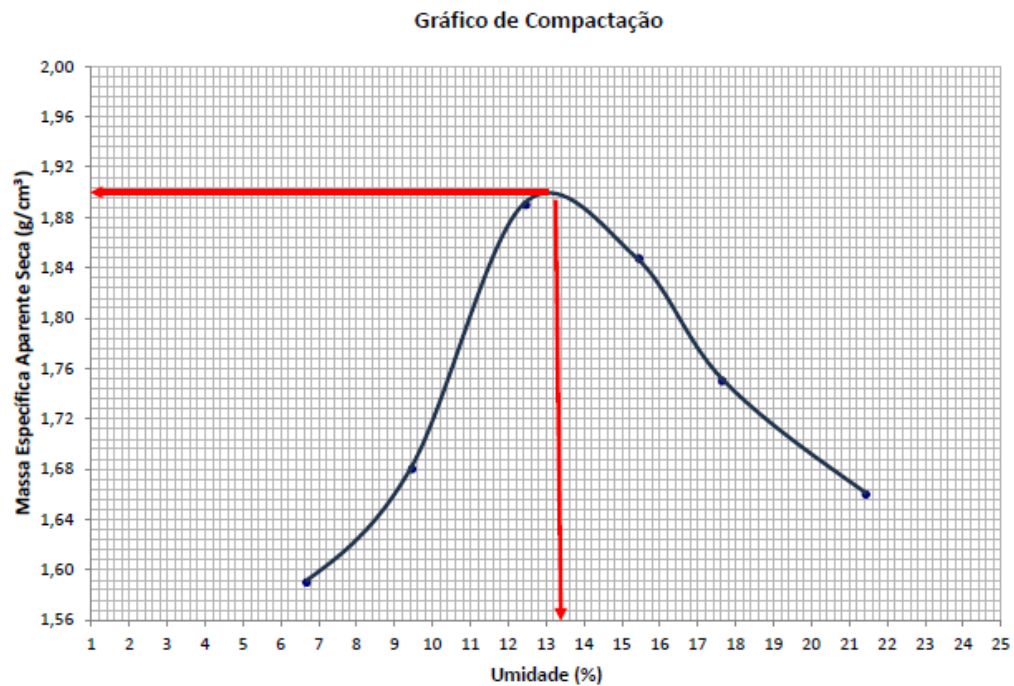
4. RESULTADOS

Abaixo serão apresentados os resultados obtidos através dos ensaios de laboratório, comparando os resultados obtidos com os métodos indiretos de determinação da susceptibilidade a expansão do solo apresentados no trabalho.

4.1. Ensaio de compactação

Com base nos resultados apresentados no ensaio, foi observado que a massa específica aparente seca máxima dessa amostra foi de $1,90 \text{ g/cm}^3$ e umidade ótima de 13%. A energia de compactação utilizada no ensaio foi a *proctor* normal. Na Figura 18 é detalhado os resultados.

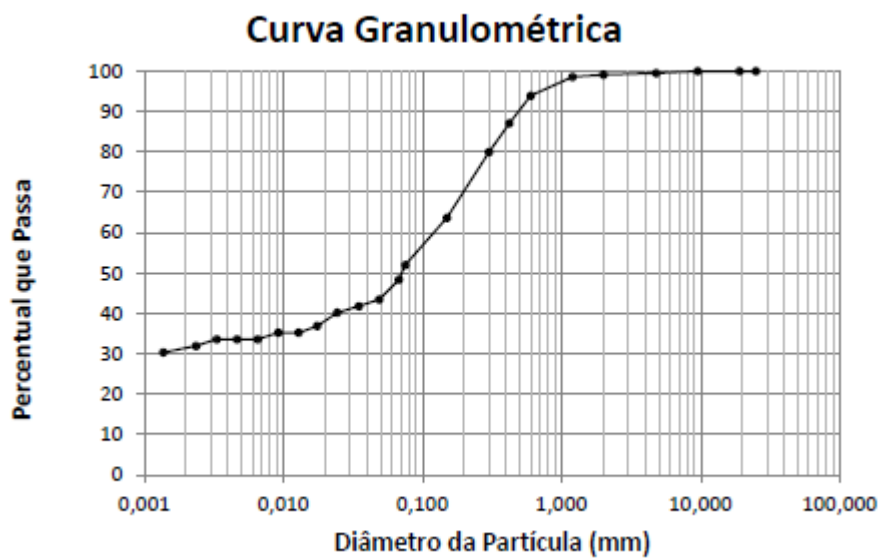
Figura 18: Resultados ensaio de compactação



4.2. Ensaio de granulometria conjunta

Com os resultados da sedimentação e do peneiramento do solo, foi possível determinar a curva granulométrica deste ensaio (Figura 21).

Figura 19: Resultado granulometria



Fonte: Autoria própria (2023).

A partir do gráfico da curva granulométrica não foi possível determinar o Coeficiente de Não Conformidade (CNU) e o Coeficiente de Curvatura (CC).

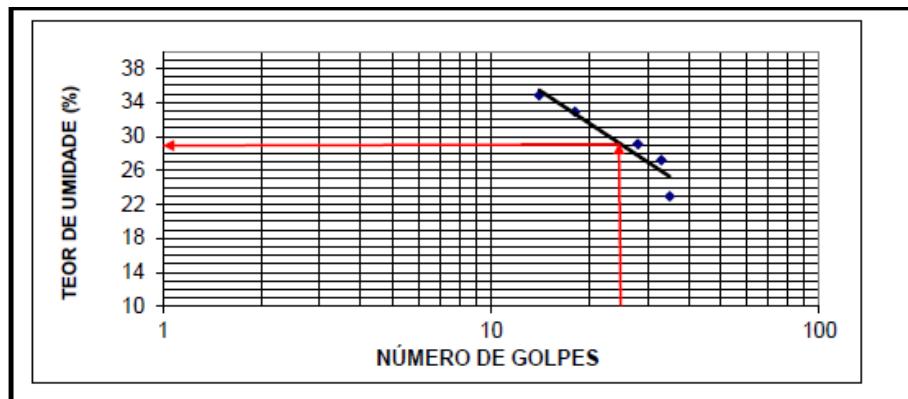
Com os resultados do peneiramento fino e peneiramento grosso, foi possível fazer a distribuição dos grãos do solo, que se dá seguinte forma:

- Argila – 31%;
- Silte – 17%;
- Areia fina – 22%;
- Areia média – 24%;
- Areia – 5%;
- Pedregulho – 1%.

4.3. Ensaio de limite de liquidez

O limite de liquidez da amostra é igual a 29%, de acordo com a curva de fluidez (Figura 20).

Figura 20: Resultado limite de liquidez



Fonte: Autoria própria (2023).

4.4. Ensaio de limite de plasticidade

Através da média da umidade obtidas no ensaio, foi obtido o limite de plasticidade igual a 4% (Figura 22).

Figura 21: Limite de plasticidade

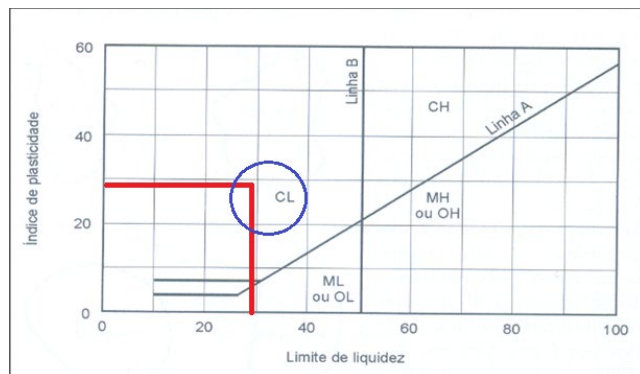
LIMITE DE PLASTICIDADE - NBR 7180					
Cápsula	16		20		
Peso Bruto Úmido (g)	7,54		8,63		
Peso Bruto Seco (g)	7,53		8,62		
Tara da Cápsula (g)	7,30		8,39		
Peso da Água (g)	0,01		0,01		
Peso do Solo Seco (g)	0,23		0,23		
Umidade (%)	4,35		4,35		
			LP(%)=	4,3%	

Fonte: Autoria própria (2023).

4.4.1. Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS)

Como a porcentagem dos finos na peneira de 200 mm da amostra ficou acima de 50%, a amostra foi identificada com solo de granulação fina e tomando a carta de plasticidade como base, o solo é caracterizado como argila de baixa compressibilidade (Figura 21).

Figura 22: Carta de plasticidade



Fonte: Adaptado pelo autor (2023).

4.4.2. Sistema de Classificação Rodoviária

Levando em consideração os dados apresentados, foi possível determinar também a classificação rodoviária da amostra, estando classificado como solo silto-argiloso grupo A-6, em que:

Tabela 7: Sistema de classificação rodoviária

Subgrupo	Amostra (%)	(%)
Peneira 200 mm	52%	> 35
LL	29%	< 40
IP	24%	> 10
IG	10,5	< 16

Fonte: Autoria própria (2023).

O valor do índice de plasticidade é igual a diferença entre o LL e o LP. Desse modo, o resultado encontrado é igual a 24% e indica um solo de alta plasticidade. Já o valor do índice de consistência é a relação entre a diferença do limite de liquidez para umidade natural (2%) e o índice de plasticidade. O valor do IC é de 8%.

4.5.Determinação da susceptibilidade do solo expansivo através de métodos indiretos

Abaixo serão apresentadas as comparações dos resultados reais obtidos em laboratório, com alguns dos métodos indiretos que foram escolhidos no trabalho. escolhidos no trabalho.

4.5.1. Critério de Priklnski (1952)

Levando em consideração o valor obtido do índice de consistência de acordo com este método, o solo foi classificado como não colapsivo ($IC < 0,5$) ou seja $IC = 0,08$.

4.5.2. Critério de Chen (1975)

Com os resultados do LL e IP, foi possível observar que o grau de expansão da amostra varia entre baixo e médio ($LL < 30$ e $IP 10 - 35$).

4.5.3. Critério de Holtz e Gibbs (1956)

De acordo com este método e com os resultados de índice de plasticidade, foi possível observar que a amostra possui de expansão médio ($IP 10 - 35$).

4.5.4. Critérios de Cuéllar (1978)

Tomando o índice de plasticidade que resultou do ensaio e utilizando o critério de Cuéllar, é possível afirmar que o solo tem grau de expansividade médio ($15 < IP < 25$).

4.5.5. Critérios de Ranganathan e Satynarayana (1965)

Com base na coleta de dados dos ensaios, foi possível observar que de acordo com este método, o grau de expansividade da amostra é baixo ($IC < 20$).

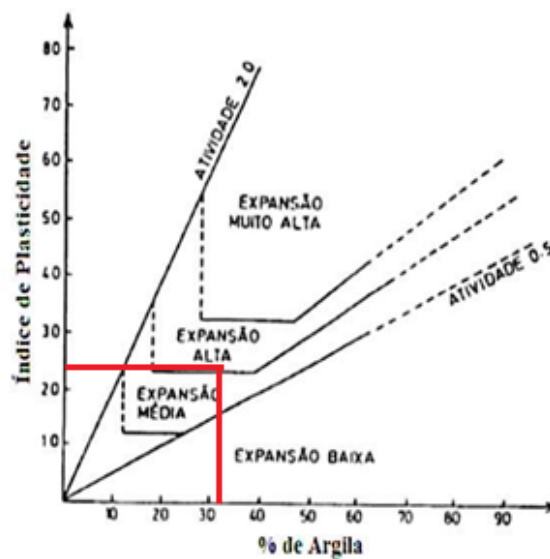
4.5.6. Critérios de USBR – HOLTZ (1953)

Observando os dados de IP (24%) e LC (8%), de acordo com este método o grau de expansividade variou entre médio e alto.

4.5.7. Critérios de Williams e Donaldson (1980)

A partir deste critério, a Figura --- demonstra que o grau de expansividade da amostra é alto.

Figura 23: Grau de expansibilidade



Fonte: Autoria própria (2023).

4.5.8. Critérios de Daksanamurthy e Raman (1973)

Após os dados coletados do ensaio de limite de liquidez, de acordo com este critério o solo apresentado possui baixo grau de expansão ($20 \leq LL \leq 35$).

Figura 24: Grau de expansividade pelos métodos indiretos

Métodos Indiretos	
CRITÉRIOS	GRAU DE EXPANSIVIDADE
Critério de Prikłonski (1952)	SOLO NÃO COLAPSÍVO
Critério de Chen (1975)	BAIXO / MÉDIO
Critério de Holtz e Gibbs (1956)	MÉDIO
Critérios de Cuéllar (1978)	MÉDIO
Critérios de Ranganathan e Satynarayana (1965)	BAIXO
Critérios de USBR – HOLTZ (1953)	MÉDIO / ALTO
Critérios de Williams e Donaldson (1980)	MÉDIO
Critérios de Daksanamurthy e Raman (1973)	BAIXO

Fonte: Autoria própria (2023).

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Após o levantamento de dados e embasamento teórico, tomando como base os métodos indiretos, é possível afirmar que o grau de susceptibilidade do solo é médio. No que se refere a granulometria, em linhas gerais, o solo estudado foi indicado como predominantemente granular, possuindo 48% de finos, 31% de partículas argilosas além de apresentar nos ensaios de limite de liquidez e plasticidade um solo de alta plasticidade. Segundo o SUCS, a amostra foi classificada como solo argiloso de baixa compressibilidade e de acordo com o sistema de classificação rodoviária, o solo coletado é classificado como tipo A-6. Por fim, como os métodos indiretos não são conclusivos, sugere-se que sejam feitos ensaios de acordo com os métodos diretos para que se possa obter resultados mais precisos.

REFERÊNCIAS

- PAIVA, S. C.; LIMA, M. A. A.; FERREIRA, M. G. V. X.; FERREIRA, S. R. M. **Propriedades geotécnicas de um solo expansivo tratado com cal**. Revista Matéria, Rio de Janeiro, v. 21, n. 2, p. 437-449, 2016.
- AYALA, J.F., GIJON, M. F., MOZO, C. O. e RODRIGUEZ J. L. S. **Mapa Previsor de Riesgos por Expansividad de Arcillas En España a Escala 1:1.000.000**. Serie: Geologia Ambiental. Instituto Geológico y Minero de España. Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas. España, Madrid, 1986.
- VARELA, Gilson Gabriel Teixeira et al. Solos expansivos no Brasil: uma revisão sistemática. 2021.
- ATAIDE, Stive Osca Falcão. **Análise do comportamento de variação de volume devido à inundação de um solo expansivo quando misturado com Areia**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco, 2017.
- BARBOSA, Valquiria. **Estudo do comportamento geotécnico de um solo argiloso de Cabrobó, potencialmente expansivo, estabilizado com cal**. Recife, 2013. 111 f. Dissertação (mestrado) - UFPE, Centro de Tecnologia e Geociências, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, 2013.
- NELSON, J.D., MILLER, D.J., *Expansive soils: problems and practice in foundation and pavement engineering*, New York, John Wiley & Sons, 1992.
- CAVALCANTE, E. H.; CAVALCANTI JUNIOR, D. A.; SANTOS, W. J. **Propriedades geotécnicas de um solo expansivo de Sergipe**. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE JOVENS GEOTÉCNICOS, v. 2, 2006.
- PRESA, Erundino Pousada. Fundações em Solos Expansivos. *Universitas*, n. 23, p. 99-99, 1978.
- PAIVA, S. C.; LIMA, M. A. A.; FERREIRA, M. G. V. X.; FERREIRA, S. R. M. **Propriedades geotécnicas de um solo expansivo tratado com cal**. Revista Matéria, Rio de Janeiro, v. 21, n. 2, p. 437-449, 2016.
- AMORIM, C. L. G. Estudo do efeito das interações água-argila no inchamento de argilominerais através da difração de raios X. 2007. Tese de Doutorado. Tese (Doutorado em Ciências). Universidade Federal do Rio de Janeiro. COPPE/UFRJ.
- VELDE, Bruce et al. Introduction to clay minerals: chemistry, origins, uses and environmental significance. London: Chapman & Hall, 1992.
- ARAÚJO, Arthur Gomes Dantas de. Análise do processo de fissuras e do comportamento de estacas granulares ancoradas submetidas a secagem e umedecimento em solo expansivo. 2020.
- HOUSECROFT, C. E.; SHARPE, A. G. Química Inorgânica / 4ª edição. Rio de Janeiro: LTC.

624p., 2013.

GRIM, Ralph E. **Clay mineralogy**. LWW, 1953.

VARGAS, M. The concept of tropical soils. In: FIRST INTERNACIONAL CONFERENCE ON GEOMECHANICS IN TROPICAL LATERITIC AND SAPROLITIC SOILS. 1985, São Paulo. **Anais...**, V. 3. São Paulo: Brazilian society for soil mechanics, 1985.

SCHREINER, H.D. (1987). State of the art review on expansive soils, Imperial College, London.

FERREIRA, S.R.M & LACERDA, W.A. (1993). Variação do volume em solo solapsível medidas através de ensaios de campo e de laboratório. *Revista Solos e Rochas*, 16(4): 245-253.

VILAR, Orencio Monje; FERREIRA, Silvio Romero de Melo. Solos colapsíveis e expansivos. **Solos não saturados no contexto geotécnico**, v. 1, p. 415-436, 2015.

BEZERRA, André Luis. Análise da expansão de um solo no estado natural e compactado com adição de cinza de casca de arroz do Município de Brejo da Madre de Deus – PE. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco, 2019.

TENÓRIO, Eduardo Antônio Guimarães. Controle da expansão dos solos com resíduos de mármore e CAL. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Campina Grande, 2018.